

Section F

Chapitre 3

Spectre électromagnétique

Le **spectre électromagnétique** est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en termes de fréquence (ou période), d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde associée, les quatre grandeurs ν (fréquence), p (période), E (énergie) et λ (longueur d'onde) étant liées deux à deux par :

- la constante de Planck h (approx. $6,626069 \times 10^{-34}$ J·s $\approx 4,13567$ meV/Hz)
- et la vitesse de la lumière c (exactement 299 792 458 m/s),

selon les formules :

- $E = h \nu = h/p$ pour l'énergie transportée par le photon,
- $c = \lambda \nu = \lambda/p$ pour le déplacement dans le vide (relativiste dans tous les référentiels) du photon,

d'où aussi :

- $E = h c/\lambda$.

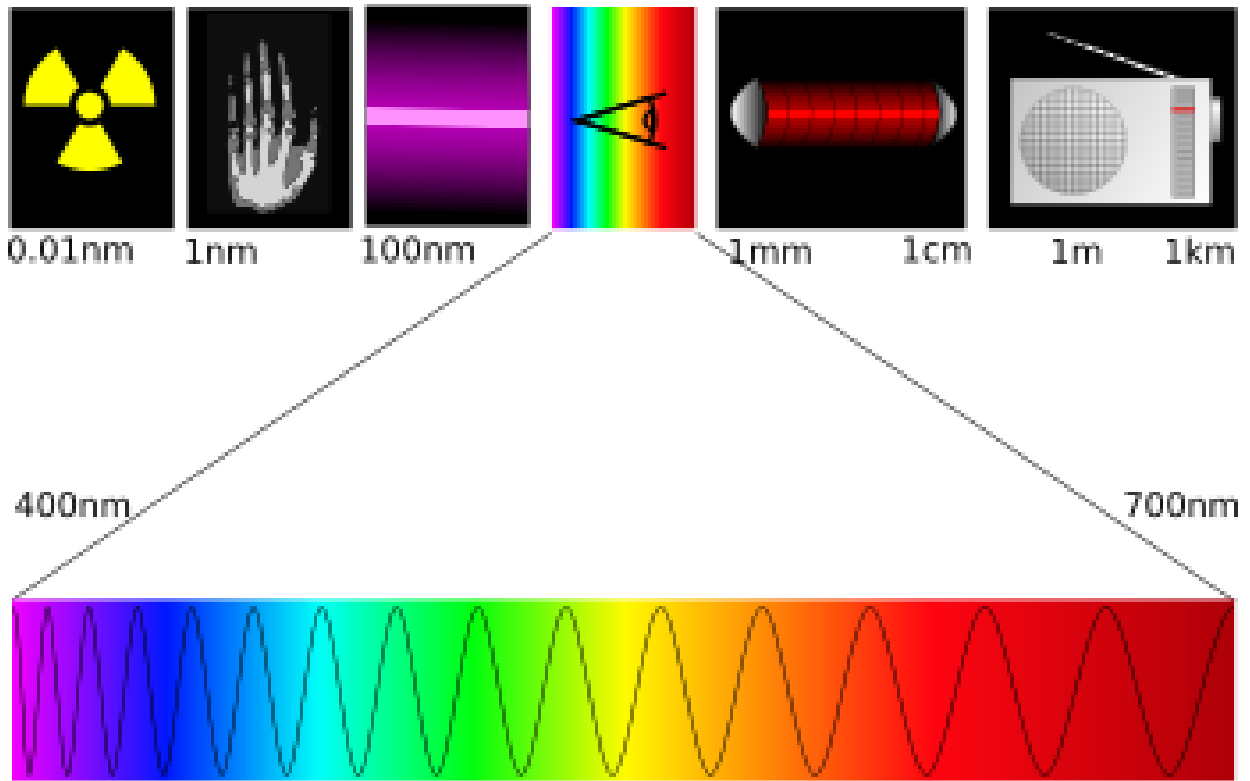
Histoire

Le terme *spectre* fut employé pour la première fois en 1666 par Isaac Newton pour se référer au phénomène par lequel un prisme de verre peut séparer les couleurs contenues dans la lumière du Soleil.

Unités de mesures

Pour les ondes radio et la lumière, on utilise habituellement la longueur d'onde. À partir des rayons X, les longueurs d'ondes sont rarement utilisées : comme on a affaire à des particules très énergétiques, l'énergie correspondant au photon X ou γ détecté est plus utile. Cette

énergie est exprimée en électron-volt (eV), soit l'énergie d'un électron accéléré par un potentiel de 1 volt.



Le domaine visible du spectre électromagnétique

La lumière blanche peut se décomposer en arc-en-ciel à l'aide d'un prisme ou d'un réseau de diffraction. Chaque « couleur spectrale » de cette décomposition correspond à une longueur d'onde précise ; cependant, la physiologie de la perception des couleurs fait qu'une couleur vue ne correspond pas nécessairement à une radiation de longueur d'onde unique mais peut être une superposition de radiations monochromatiques. La spectrométrie étudie les procédés de décomposition, d'observation et de mesure des radiations en ondes monochromatiques.

Les photons de lumière visible les plus énergétiques (violet) sont à 3 eV. Les rayons X couvrent la gamme 100 eV à 100 keV. Les rayons γ sont au-delà de 100 keV. Des photons γ de plus de 100 MeV (100 000 000 eV) émis par un quasar ont été détectés.

Spectre d'émission

Des atomes ou molécules excités (par exemple par chocs) se désexcitent en émettant une onde électromagnétique. Celle-ci peut se décomposer en une superposition d'ondes sinusoïdales (monochromatiques) caractérisées par leurs longueurs d'onde. Le spectre est constitué par l'ensemble des longueurs d'ondes présentes. On peut le matérialiser à l'aide d'un prisme de décomposition de la lumière en un ensemble de lignes, les raies spectrales, qui correspondent aux différentes longueurs d'ondes émises. Pour plus de précision, on peut également représenter ce spectre comme un graphe de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde.

L'observation du spectre d'émission de l'hydrogène se fait au moyen d'un tube Geissler qui comporte deux électrodes et de l'hydrogène sous faible pression. Les électrodes sont soumises à une différence de potentiel de 1000 V. L'important champ électrique accélère les ions présents qui par chocs excitent les atomes d'hydrogène. Lors de leur désexcitation, ils émettent de la lumière qui est analysée par un spectroscopie. Dans tous les cas on observe (dans le visible) le même spectre composé de 4 raies (spectres de raies) aux longueurs d'ondes : 410 nm, 434 nm, 486 nm, 656 nm.

Niels Bohr interprétera alors l'émission de lumière par l'émission d'un photon lorsque l'atome passe d'un niveau d'énergie à un autre. Le spectre d'émission de n'importe quel élément peut être obtenu en chauffant cet élément, puis en analysant le rayonnement émis par la matière. Ce spectre est caractéristique de l'élément.

Spectre d'absorption

Le principe est exactement le même que celui du spectre d'émission : à un niveau d'énergie donné correspond une longueur d'onde. Mais au lieu d'exciter de la matière (par exemple en la chauffant) pour qu'elle émette de la lumière, on l'éclaire avec de la lumière blanche (donc contenant toutes les longueurs d'ondes) pour voir quelles longueurs d'ondes sont absorbées. Les niveaux d'énergie étant caractéristiques de chaque élément, le spectre d'absorption d'un élément est exactement le complémentaire du spectre d'émission. On s'en sert notamment en astrophysique : par exemple, pour déterminer la composition de nuages gazeux, on étudie leur spectre d'absorption en se servant des étoiles se situant en arrière-plan comme source de lumière. C'est d'une manière générale le but de la spectrographie d'absorption : identifier des éléments inconnus (ou des mélanges) par leur spectre.

Spectre électromagnétique

Spectre électromagnétique : Radioélectricité · Spectre radiofréquence · Bandes VHF-UHF · Spectre micro-ondes

Fréquence	9 kHz	1 GHz	300 GHz	3 THz	405 THz	480 THz	508 THz	530 THz	577 THz	612 THz	690 THz	750 THz	30 PHz	30 EHz
Longueur d'onde	33 km	30 cm	1 mm	100 μm	745 nm	625 nm	590 nm	565 nm	520 nm	490 nm	435 nm	400 nm	10 nm	10 pm
Bande	ondes radio	micro-ondes	térahertz	infrarouge	rouge	orange	jaune	vert	cyan	bleu	violet	ultraviolet	rayons X	rayons γ
		<i>rayonnements pénétrants</i>		lumière visible								<i>rayonnements ionisants</i>		

Hypothèse de Planck

En 1900, **Max Planck** découvre la loi spectrale du rayonnement d'un corps noir (publiée en 1901) en essayant de réconcilier la loi de Rayleigh-Jeans qui fonctionne aux grandes longueurs d'ondes (basses fréquences) et la loi de Wien qui fonctionne aux petites longueurs d'ondes (hautes fréquences). Il trouve que sa propre fonction correspondait remarquablement bien aux données pour toutes les longueurs d'ondes.

La correction de la loi de Rayleigh-Jeans est particulièrement importante, car elle est construite sur une base théorique forte : la thermodynamique telle qu'elle était connue à l'époque ; mais souffre d'un défaut majeur aux longueurs d'ondes courtes : la catastrophe ultraviolette. Ce point suggère que la thermodynamique est fautive. Planck essaye donc de produire une nouvelle théorie fondamentale destinée à remplacer la thermodynamique.

La loi de Rayleigh-Jeans et la loi de Planck utilisent le théorème d'équipartition et font correspondre un oscillateur à chaque fréquence. Rayleigh suppose que tous les oscillateurs sont également excités, sa loi prédit que les oscillateurs de très courtes longueurs d'ondes sont fortement excités même à température ambiante.

Planck déduit sa loi de façon empirique. Il la justifie en postulant que l'énergie émise ou absorbée par les oscillateurs ne se fait que par petits paquets d'énergie E . Ces paquets seraient directement reliés à la fréquence des oscillations selon la formule qu'il expose le 14 décembre 1900 :

$$E = h\nu$$

où,

h est la constante de Planck

ν est la fréquence du rayonnement électromagnétique.

Cette hypothèse permet de limiter l'excitation des oscillateurs aux courtes longueurs d'ondes, puisqu'ils ne peuvent absorber qu'une énergie au moins égale à $h\nu$.

Bien qu'il soit facile maintenant d'interpréter cela en termes de quantification de la lumière en photons, Planck ne propose pas cette quantification.

Cela apparaît clairement dans son article de 1901, dans les références qu'il donne dans cet article sur le travail qu'il a effectué sur le sujet, ainsi que dans son livre *Theory of Heat Radiation (Théorie du rayonnement de la chaleur)* où il explique que sa constante concerne les oscillateurs.

À l'époque, cette relation n'est considérée que comme un artifice de calcul mathématique. L'idée de quantification est développée par d'autres, notamment Einstein qui en étudiant l'effet photoélectrique propose un modèle et une équation dans lesquels la lumière est non seulement émise mais aussi absorbée par paquets ou photons ; l'introduction de la nature corpusculaire de la lumière.

Constante de Planck

En physique, la **constante de Planck**, notée h , est une constante utilisée pour décrire la taille des quanta. Elle joue un rôle central dans la mécanique quantique et a été nommée d'après le physicien Max Planck.

La constante de Planck, notée h relie notamment l'énergie d'un photon à sa fréquence ν (lettre grecque nu) :

$$E = h \nu$$

Valeur

Dans les unités SI 2006 recommande la valeur suivante :

$$h \approx 6,626\,068\,96 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s},$$

avec une incertitude standard de $\pm 0,000\,000\,33 \times 10^{-34}$ J.s, soit une incertitude relative de $\pm 5,0 \times 10^{-5}$ ‰.

Constante de Planck réduite ou de Dirac

La constante de Planck possède les dimensions d'une énergie multipliée par un temps. Il est possible d'écrire ces unités sous la forme d'une quantité de mouvement par une longueur ($\text{kg}\cdot\text{mètre}^2\cdot\text{s}^{-1}$) c'est-à-dire les mêmes unités que le moment angulaire.

Une grandeur associée est le quantum d'action, également appelé constante de Planck réduite ou encore parfois constante de Dirac, notée \hbar et prononcée « h barre » :

- Valeur en joules-secondes :

$$\hbar = h / 2 \pi \approx 1,054\,571\,628 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s},$$

avec une incertitude standard de $\pm 0,000\,000\,053 \times 10^{-34}$ J.s.

- Valeur en électron-volts-secondes :

$$\hbar \approx 6,582\,118\,99 \times 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s},$$

avec une incertitude standard de $\pm 0,000\,000\,16 \times 10^{-16}$ eV.s, soit une incertitude relative de $\pm 2,5 \times 10^{-5}$ ‰.

- Valeur en MeV-fermis :

$$\hbar c \approx 197,326\,963\,1 \text{ MeV}\cdot\text{fm},$$

avec une incertitude standard de $\pm 0,000\,004\,9 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$, soit une incertitude relative de $\pm 2,5 \times 10^{-5} \%$.

Interprétation physique

La constante de Planck est utilisée pour décrire les phénomènes de quantification qui se produisent avec les particules et dont certaines propriétés physiques ne prennent que des valeurs multiples de valeurs fixes au lieu d'un ensemble continu de valeurs possibles. Par exemple, l'énergie d'une particule est reliée à sa fréquence ν par :

$$E = h \nu.$$

On retrouve de telles conditions de quantification dans toute la mécanique quantique. Par exemple, si J est le moment angulaire total d'un système et J_z le moment angulaire du système mesuré sur une direction quelconque, ces quantités ne peuvent prendre que les valeurs :

- $J^2 = j(j+1)\hbar^2$, avec : $2j = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$
- $J_z = m\hbar$, avec : $m = -j, -j+1, \dots, j-1, j$.

En conséquence, \hbar est parfois considérée comme un quantum de moment angulaire puisque le moment angulaire de n'importe quel système, mesuré par rapport à n'importe quel choix particulier d'axe, est toujours un multiple entier de cette valeur.

La constante de Planck réduite apparaît également dans les énoncés du principe d'incertitude de Heisenberg. L'écart type d'une mesure de position Δx et celui d'une mesure de quantité de mouvement le long du même axe Δp obéissent à la relation suivante :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar.$$

La constante de Planck réduite \hbar est également employée dans le système d'unités dit des unités de Planck.